

## 橋梁補修計画へのウイルス進化型 GA の適用に関する研究

## A STUDY ON APPLYING VIRUS-EVOLUTIONARY GA TO BRIDGE REPAIR PLANNING

近田 康夫\*・清水 宏孝\*\*・廣瀬 彰則\*\*\*

Yasuo CHIAKTA, Hirotaka SHIMIZU and Akinori HIROSE

\*工博, 金沢大学助教授, 金沢大学大学院自然科学研究科システム創成科学専攻 (〒 920-8667 金沢市小立野 2-40-20)

\*\*工修, 滋賀県技師, 長浜土木事務所道路計画課 (〒 526-0033 長浜市平方町 1152-2)

\*\*\* 中央復建コンサルタンツ株式会社 (金沢大学大学院自然科学研究科システム創成科学専攻)

For making alternatives of repair planning that determine the combination of bridge and their parts to be repaired, the repair planning is formulated as knapsack problem, and Genetic Algorithm is applied. This study presents a new approach to the simple GA by introducing the virus-evolutionary GA. Virus infection is adopted in addition to crossover and mutation as gene operation. Methods of virus infection and values of parameters are investigated. The results of numerical examples show good performance of virus-evolutionary GA.

**Key Words :** Bridge maintenance, Genetic algorithm, Virus-evolutionary GA

キーワード : 橋梁補修, 遺伝的アルゴリズム, ウイルス進化論

## 1. はじめに

現在我が国には、数多くの橋梁が存在し、それらの多くは何等かの形で補修を必要としている。橋梁は、計画・設計・施工・供用の後、補修・補強を経て、架け替えというライフサイクルをたどり、十分な維持管理のもとでは目標とする耐用年数以上を供用することができる。したがって、既存橋梁の維持管理を行っていくことは、新規橋梁の建設と同等以上に重要視されるようになってきている。しかし、補修を必要とする橋梁が増加する一方で、補修に与えられる予算には限度があり、損傷箇所を全て補修することは現実的に不可能である。このため、その予算内で損傷箇所をより効率よく選択して、費用対効果を最大限にし得る補修計画を立案する手法の確立が急務であるといえる。

そこで、筆者らは橋梁の評価を行うことによって、その評価値の増加が予算内で最大となるような橋梁補修計画の作成を試みた<sup>1)2)</sup>。また、従来構築されてきた補修計画支援が橋梁の部位単位であったのに対し、この補修部位をパターン化することによって、橋梁群全体での補修効果を最大にすることに加えて、橋梁単位でも合理的で無駄のない補修部位の選択が行われるように GA の線列におけるコーディングの変更を行った。その上で、解探索の効率を高め、より優れた解を得るために、単純 GA(SGA) に代えて、ウイルス進化型 GA(VGA) を援用した<sup>3)</sup>。同様の橋梁維持管理支援システムへのウイルス進化型 GA の適用を検討した報告もある<sup>4)</sup>。なお、橋梁群ではなく一つの橋梁のライフサイクルに着目してその維持管理の最適化を行うことを目的に GA を適用する試みもなされているが<sup>5)</sup>、橋梁の劣化予測などで不明な点が多いと考え、ここでは、上述のアプローチをとっている。

本研究では、橋梁補修計画立案に対してウイルス進化型 GA(VGA) を適用するにあたって検討したパラメー

タ設定やウイルスの感染方法、評価方法などについて報告する。対象を限定してはいるが、報告する検討内容は、他の問題へウイルス進化型 GA を適用する際の資料としても役立つと考える。

## 2. 橋梁補修計画支援システムの概要

まず、橋梁の定期点検によって得られた点検結果より、補修の対象となる要補修部位の選定を行う。この要補修部位を、それぞればらばらに補修するより、同時に補修することが好ましい項目同士を同時に補修した方が、実務的にも経済的にも効果的であるといえる。そこで、得られた要補修部位を橋梁単位で一定のルールに従って組み合わせ、数種類の補修パターンとして用意する。続いて、各橋梁の補修パターンごとに補修費用ならびに評価値の増加量の算出を行う。その上で、各橋梁ごとに用意された補修パターンの中から、一定の予算内で補修による橋梁群全体の評価値の増加が最大となるような補修パターンの組み合わせを探る問題をナップサック問題として定式化する。このナップサック問題の組み合わせ総数は膨大なものとなるため、その解探索にウイルス進化型 GA を援用する。その結果得られた解が補修計画代替案となる。

以下、この流れに沿いながら具体的な説明を行っていく。

## 2.1 橋梁点検台帳

橋梁のデータには I 県が調査を行った表-1 に示すような 14 の点検項目と総合評価からなる橋梁点検台帳の点検結果を用いた。各点検項目の基準として、○, △, × の 3 段階評価が設定され、各橋梁の損傷度評価は、各点検項目の結果に基づいて専門家が、A, B, C, D の 4 段階で行う。なお、本研究では今後各要因の判断基準を ○, △, × の順にそれぞれ 1, 2, 3, 損傷度評価を

表-1 点検結果の例

| 橋梁名 | 橋面舗装 | 地覆高欄 | 床版  | 床組構 | 主構  | 支承  | 伸縮継手 | 排水装置 | 塗装  | 洗掘変動 | 躯体変動 | 安定構造 | 安定材質 | 耐震性 | 損傷度評価 |
|-----|------|------|-----|-----|-----|-----|------|------|-----|------|------|------|------|-----|-------|
| A 橋 | △    | ○    | ○   | ○   | ○   | ○   | △    | △    | -   | ○    | ○    | ○    | ○    | ○   | B     |
| B 橋 | ○    | ○    | ○   | ○   | ○   | ○   | ○    | ○    | ○   | ○    | ○    | ○    | ○    | ○   | D     |
| C 橋 | ○    | ○    | ×   | ×   | ×   | ×   | ×    | ×    | ○   | ○    | ○    | ○    | ○    | ○   | A     |
| ... | ...  | ...  | ... | ... | ... | ... | ...  | ...  | ... | ...  | ...  | ...  | ...  | ... | ...   |
| Z 橋 | ○    | ○    | ○   | △   | ○   | ○   | ○    | ○    | ○   | ○    | ○    | ○    | ○    | ○   | C     |

・コンクリート橋(表では、B、C 橋)に関して塗装の項目はない。

A, B, C, D の順にそれぞれ 1, 2, 3, 4 と数値化することにした。

この点検台帳には 208 橋の点検結果が収録されているが、このうち、損傷が著しいと橋梁自体の架け替えが必要となってしまう主構・洗掘変動・躯体変動・安定構造(下部工)の 4 つの点検項目が 1(損傷なし)であった 75 橋を橋梁補修計画案の対象とした。この 4 つの項目を除いたのは、本研究は橋梁の補修計画を対象にしており、橋梁架け替えは考慮していないためである。

なお以下では、鋼橋を ST 橋、(鉄筋)コンクリート橋を RC 橋と記述する。

## 2.2 補修部位のパターン化

橋梁を補修する際には、足場などの制約から、同時に補修することが好ましい項目がある。本研究では、そのような部位同士の相互関係を考慮し、同時に補修することが好ましい項目がばらばらに選択されることのないように、あらかじめ補修部位をセットにして補修パターンとして用意した。こうすることで、橋梁単位で見たときに、より無駄のない合理的な補修計画案を作成可能とすることができる。

部位を組み合わせる際のルールは表-2 に示すものである。このルールに従って、点検台帳の点検結果をもとに補修部位を組み合わせ、各橋梁ごとに幾通りかの補修パターンを作成し、さらにパターン同士を組み合わせることによって、全く補修しないパターンから全ての部位を補修するパターンまでを用意した。こうして作成した補修パターンの数は、本研究で利用した 75 橋のデータでは、補修パターン数が最小となったのが 2 パターン、最大が ST6 橋の 42 パターンで、橋梁群全体では 512 通りの補修パターンとなった。

なお、ここで使用している組み合わせのルールは橋梁の種類や損傷状態等の要因を考慮しておらず、全ての橋梁に対応できるような柔軟なものとは言い難いが、補修案の大まかな把握には十分であろう。このルールを改良していくことによって、より優れた補修計画案が作成できるものと思われる。

## 2.3 橋梁の評価

橋梁を評価するために、重要度係数を用いた線形判別式を式(1)のように与えた。また、補修を施した橋梁はその評価値が増加するように式中の  $b_{ji}$  ( $i = 1 \cdots 3$ )を設定した。

(評価式)

表-2 同時に補修することが好ましい項目

| タイプ | 点検項目 | 舗装 | 高欄 | 床版 | 床組 | 支承 | 継手 | 排水 | 塗装 | 材質 | 耐震 |
|-----|------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 1   | 橋面舗装 | ○  |    |    |    |    | ○  | ②  |    |    |    |
| 2   | 地覆高欄 | ○  | ①  | ②  |    |    | ○  | ②  |    |    |    |
| 3   | 床版   | ○  |    | ②  | ②  | ③  |    |    | ②  |    |    |
| 4   | 床組構  |    |    | ②  | ②  |    |    |    |    | ④  |    |
| 6   | 支承   |    |    |    |    | ③  |    |    | ②  |    | ③  |
| 7   | 伸縮継手 | ○  |    |    |    |    | ○  |    |    |    |    |
| 8   | 排水装置 | ○  |    |    |    |    |    | ②  |    |    |    |
| 9   | 塗装   |    |    |    |    | ③  |    |    | ②  |    |    |
| 13  | 安定材質 |    |    |    |    | ③  | ○  |    |    | ④  |    |
| 14  | 耐震性  |    |    |    |    | ③  |    |    |    |    | ③  |

数字は足場の種類(同じ番号であれば共有可)

①②つり足場、③張り出し足場、④枠組み足場

表-3 感度解析による各点検項目の重要度係数

|      | 橋面舗装 | 地覆高欄 | 床版  | 床組構 | 主構  | 支承  | 伸縮継手 | 排水装置 | 塗装  | 洗掘変動 | 躯体変動 | 安定構造 | 安定材質 | 耐震性 |
|------|------|------|-----|-----|-----|-----|------|------|-----|------|------|------|------|-----|
| RC 橋 | .17  | .23  | .30 | .13 | .08 | .13 | .23  | .08  | -   | .18  | .12  | .36  | .32  | .17 |
| ST 橋 | .17  | .21  | .22 | .13 | .08 | .13 | .27  | .07  | .08 | .07  | .59  | .36  | .18  | .14 |

$$Y = \sum_{j=1}^R \sum_{k=1}^{c_j} w_j b_{jk} \delta_{jk}, \begin{cases} b_{j1} = 300 \\ b_{j2} = 200 \\ b_{j3} = 100 \end{cases} \quad (1)$$

なお、 $\delta_{jk}$  は  $j$  アイテム  $k$  カテゴリに反応したとき 1、その他のとき 0 である。

ここで、 $R$  はアイテム数、 $c_j$  は  $j$  アイテムのカテゴリ数、 $w_j$  は  $j$  アイテムの重要度係数である。

重要度係数には、ニューラルネットワークの感度解析によって得られた値を使用しており、表-3 に示すように ST 橋と RC 橋とに分けたものとなっている。

## 2.4 橋梁各部位の補修費用・足場の種類と費用

補修計画を行うにあたり、専門家のアドバイスに基づいて、橋梁各部位の補修費用および足場の費用を表 4、表 5 に示すとおりに設定した。本来ならば、橋梁の種類・損傷度の程度などにより、補修方法・補修費用が異なってくると思われるが、ここでは一律に設定している。補修案の大まかな把握にはこれで十分であろう。

なお、表 5 において、○の中の数字は足場の種類を表しており、同じ番号の足場であれば、共有が可能であるとして、足場費用の計算を行う。

## 2.5 ナップサック問題の適用

本研究における橋梁補修部位の組み合わせ問題を一般のナップサック問題と比較すると、一定の容量を持った袋(ナップサック)が与えられた予算に、荷物が各橋梁部位の補修費用に、それぞれ相当する。いま、一つの橋梁につき 10 の補修パターンがあるとすれば、その組み合わせの総数は  $10^{75}$  通りとなり、膨大な計算量と時間を要することになる。

表-4 各部位の補修内容とその費用

| 部位       | 補修内容                    | 補修費用 (千円)     |
|----------|-------------------------|---------------|
| 橋面舗装     | オーバーレイ                  | 3 (単位面積当たり)   |
| 地覆高欄     | 旧地覆撤去<br>地覆・高欄設置        | 80 (単位長さ当たり)  |
| 床版       | 旧床版撤去<br>新床版建設          | 100 (単位面積当たり) |
| 床組構      | 増設桁工                    | 850 (単位重量当たり) |
| 支承       | 杓交換 (50tf)              | 500 (1 箇所当たり) |
| 伸縮継手     | ジョイント交換<br>(ゴム, 鋼, アルミ) | 150 (単位長さ当たり) |
| 排水装置     | 塩化ビニル管交換                | 5 (単位長さ当たり)   |
| 塗装       | ケレン, 下塗り,<br>中塗り, 上塗り   | 10 (単位面積当たり)  |
| 安定性 (材質) | ASR 補修                  | 29 (単位面積当たり)  |
| 耐震性      | 移動制限装置設置                | 500 (1 基当たり)  |

表-5 各部位の足場の種類と費用

| 部位   | 足場の種類   | 費用 (千円)       |
|------|---------|---------------|
| 橋面舗装 | 必要なし    |               |
| 地覆高欄 | ①つり足場   | 10 (単位長さ当たり)  |
| 床版   | ②つり足場   | 5 (単位面積当たり)   |
| 床組構  | ②つり足場   | 5 (単位面積当たり)   |
| 支承   | ③張り出し足場 | 3 (単位面積当たり)   |
| 伸縮継手 | 必要なし    |               |
| 排水装置 | ②つり足場   | 5 (単位面積当たり)   |
| 塗装   | ②つり足場   | 2.5 (単位面積当たり) |
| 安定材質 | ④枠組み足場  | 3 (単位面積当たり)   |
| 耐震性  | ③張り出し足場 | 3 (単位面積当たり)   |

ここで、橋梁の補修計画にナップサック問題を適用するにあたり、式 (2)、式 (3) のように目的関数、制約条件を設定した。

(無次元化した目的関数)

$$F_a = \frac{\sum_{i=1}^n (e_{i2} - e_{i1})}{\zeta} - \frac{g}{E} \Rightarrow \max \quad (2)$$

(制約条件)

$$g = E - C \geq 0 \quad (3)$$

- $n$  : 橋梁数  
 $e_{i2}$  : 補修後の  $i$  番目の橋梁の評価値  
 $e_{i1}$  : 補修前の  $i$  番目の橋梁の評価値  
 $E$  : 予算  
 $C$  : 補修費用合計  
 $\zeta$  : 全ての部位を補修した場合の評価値増加量  $\times$   $\frac{\text{予算}}{\text{総費用}}$

この目的関数は、橋梁の評価値と費用という次元の異なった値を一つの式で扱えるように無次元化したものであり、橋梁の評価値の増加を最大に、また予算を使い切る方向に向かわせるようにしたものである。また、予算によるパラメータの調整が不要になるという利点もある。

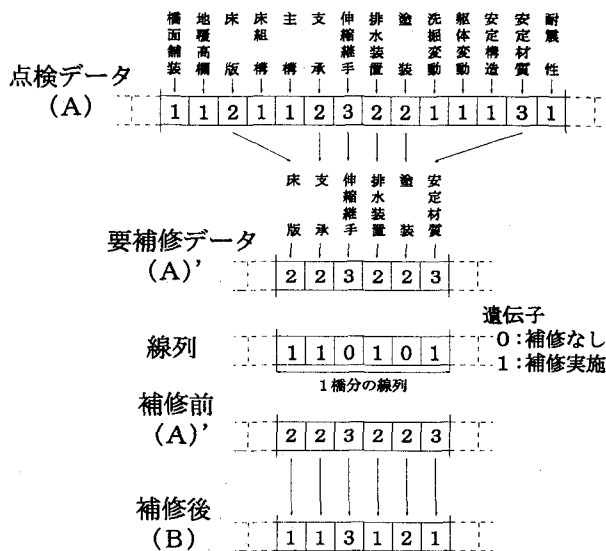


図-1 部位単位での補修計画における遺伝子フォーマット

| 遺伝子 | 補修タイプ  | 補修対象部位       | 補修費用 (千円) | 評価値増加量 | 投資効率     |
|-----|--------|--------------|-----------|--------|----------|
| 0   | なし     |              | 0.0       | 0      | 0.0      |
| 1   | 2      | 高欄           | 5400.0    | 21     | 0.003889 |
| 2   | 6      | 支承、塗装        | 5437.5    | 34     | 0.006253 |
| 3   | 13     | 支承、耐震性       | 9240.0    | 44     | 0.004762 |
| 4   | 2・6    | 高欄、支承、塗装     | 10837.5   | 55     | 0.005075 |
| 5   | 2・13   | 高欄、支承、耐震性    | 14640.0   | 65     | 0.004440 |
| 6   | 6・13   | 支承、塗装、耐震性    | 11677.5   | 52     | 0.004453 |
| 7   | 2・6・13 | 高欄、支承、塗装、耐震性 | 17077.5   | 73     | 0.004275 |

個体 A

|   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|
| 3 | 9 | 6 | 0 | 5 |
|---|---|---|---|---|

X 橋

図-2 パターン化した補修計画の遺伝子のコーディング

なお、補修対象部位を全て補修した場合の補修費用は 25 億 1034 万 1 千円であるが、ここでは補修に割り当てる予算は 5 億円とした。また、全ての部位を補修した場合の橋梁群全体の評価値の増加量は 4811 となる。従って、 $\zeta$  の値は 958.235 となり、仮に今、補修による評価値の増加量が 3800、補修費用が 4 億 9000 万円とすると、無次元化関数の右辺第一項は、3.965、第二項は 0.00398 となり、その比は約 996:1 となる。

## 2.6 遺伝的アルゴリズム (GA) の採用

遺伝的アルゴリズムとは、生物進化 (選択淘汰・突然変異) のメカニズムを工学的に応用したものであり、確率的探索・学習・最適化の一手法と考えることができる。本研究では、代替案を作成するにあたり GA を採用する。これにより、膨大な補修箇所を組み合わせたの中から、確率的に優れた組み合わせを短時間で見つけ出すことができる。

GA を適用するためには遺伝子のコーディングを行わなければならないが、これまで構築されてきた部位単位での補修計画支援<sup>1)2)</sup>では、図-1 に示すようなコー

ディングが行われていた。これは、染色体(線列)が0と1の配列で表現されており、対応する橋梁の各部位に対して、遺伝子が0の場合は補修を行わないことを表し、1の場合は補修することを表している。

これに対し、本研究では、線列は一つの遺伝子に1橋梁の補修パターンが対応する数値列として表現されている(図-2)。

なお、選択・淘汰の方法には、エリートの保存と増殖を採用した。また、交叉の手法としては一点交叉を採用している。

## 2.7 ウイルス進化論の導入

ウイルス進化論とは、進化はウイルス感染によって起こるという仮説である<sup>6)</sup>。ウイルスによる遺伝子の水平移動が起こることを認めれば、種の急速な変化、種の急速な絶滅、定向進化、平行進化など、ダーウィン進化論では説明できなかった難点を説明できるようになる。

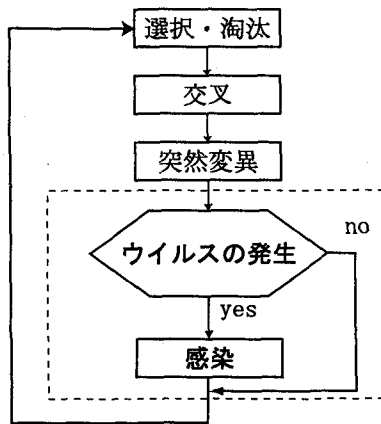


図-3 ウイルス進化型 GA の基本的な流れ

従来の GA では、遺伝的操作に選択、淘汰、交叉および突然変異を行うが、ウイルス進化型 GA では、これらの遺伝的操作に加えてウイルスの発生と感染を行う(図-3)。

感染の方法は文献<sup>7)</sup>を参考に、以下に示す3通りの方法で行った。

### TypeA

線列に関係なくランダムに発生させた遺伝子を感染させる(図-4)。

### TypeB

ランダムに発生させた遺伝子をまず1個の個体に感染させ、その個体の適応度が上昇した場合にのみ、他の個体にも感染させる(図-5)。

### TypeC

まず、各遺伝子座に入りうる補修パターンの一つ一つをウイルスとして定義し、この一つ一つにウイルス自身の適応度を与える。次に、一定の世代間隔に従ってウイルスを発生させ、ウイルスが発生したら、ラン

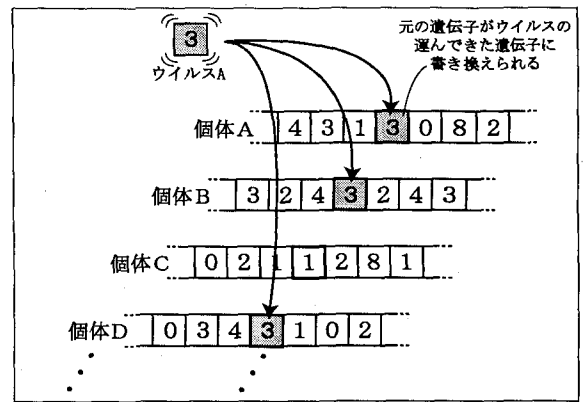


図-4 感染手法 (TypeA)

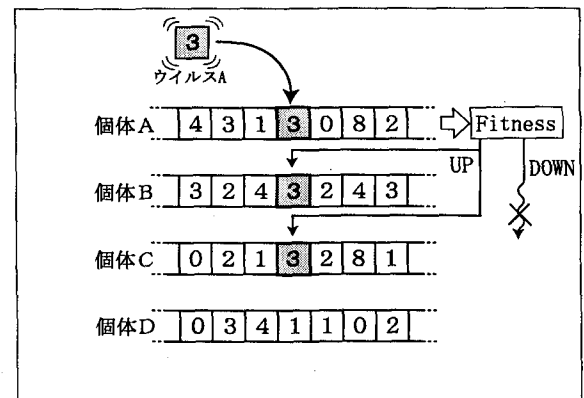


図-5 感染手法 (TypeB)

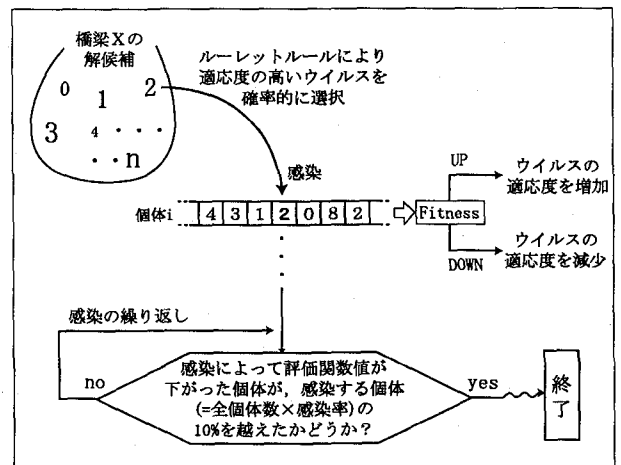


図-6 感染手法 (TypeC)

ダムに選択した個体に感染させる。ウイルスに感染した個体は、そのウイルスが運んできた遺伝子によって新たな遺伝子に書き換えられる。ここで、感染させるウイルスの選択は、それぞれのウイルスが持つ適応度に応じて確率的に行う。ウイルス感染が起った場合、感染した個体の適応度を計算し、適応度の増減に従ってウイルスの適応度を変更する(図-6)。こうして一定の感染率のもとで次々と他の個体にウイルスを感染させていき、感染によって評価関数値が下がった個体が感

染する個体数(=個体数×感染率)の10%を超えたら、その時点で感染を終了させる。なお、ウイルスの適応度を式(4)で定義する。ここで $a$ は初期世代におけるウイルスの適応度であり、 $a=10.0$ と設定した。また、ウイルスの適応度にはべき乗スケールリングを施し、ルーレットルールによって遺伝子を選択している(図-6)。

$$f_0 = a$$
$$f_{i+1} = f_i + (F_2 - F_1) \tag{4}$$

$a$  : 初期世代のウイルスの適応度  
 $f_i$  :  $i$ 回の感染後のウイルスの適応度  
 $F_1$  : ウイルス感染した個体の感染前評価関数値  
 $F_2$  : ウイルス感染した個体の感染後評価関数値

2.8 収束条件

本研究では、以下のような収束条件を設定し、収束条件を満たした場合にGAの計算を終了とした。

- 集団中の適応度最大の個体が5000世代更新されなかった場合。
- 集団中の個体が、すべて同一になった場合。
- 世代交代が10000世代に到達した場合。

2.9 代替案の決定

代替案の決定は、橋梁単位で用意した補修パターンの中から、最大の効果をあげるようなパターンの組み合わせを選択することで行われる。GAによる解探索によって得られた最も適応度の高い個体の線列を基に、橋梁補修計画案の作成を行う。線列からは橋梁ごとの補修パターンが得られるため、この補修パターンから橋梁ごとの補修部位が決定されることになる。

3. 数値実験

3.1 部位単位の補修計画とパターン化した補修計画との比較

まず、本研究では従来の部位単位での補修計画から、補修部位をパターン化した補修計画へとコーディングを変更したため、この点について比較のための数値実験を行った。

なお、数値実験では、個体数を100、エリート個体数を1、交叉を1点交叉として数値実験を行った。また交叉確率と突然変異確率を、部位単位の手法で使したものを用いたものを表-6に、パターン化した手法で使したものを表-7示す。これらは予備的な数値実験において最適化を図ったものである。

表-6 SGAの諸数値(部位単位)

|       |        |
|-------|--------|
| 交叉率   | : 0.6  |
| 突然変異率 | : 0.05 |

表-7 SGAの諸数値(補修部位のパターン化)

|       |        |
|-------|--------|
| 交叉率   | : 0.9  |
| 突然変異率 | : 0.07 |

図-7はそれぞれのコーディング下における評価関数値を示したものである。補修部位をパターン化した手

法は、橋梁単位での合理的な補修代替案の作成は可能であるが、部位選択の自由度は下がり、橋梁群全体での補修による評価値の増加量に影響を及ぼすものと考えられるのに対し、従来の部位単位での補修計画では、部位の選択をばらばらに行うため、自由度が大きく、評価値の増加量も大きなものになると期待できる。しかし、図-7からは、パターン化した補修計画の方が、部位単位での補修計画に比べて、評価関数値が大きな値となった。この原因として考えられるのは、まず、補修パターンの中に投資効率が良く評価値の増加を妨げないような部位の組合せが含まれていたこと、補修部位をパターン化することによって解空間が狭まったため、解探索の能力が向上し、より最適解に近い解が得られたということが考えられる。また、従来の部位単位での補修計画では、足場を組むことを考慮しても、補修部位を共有する方向へは向かわないため、足場の費用がそのまま補修費用の増加につながったのに対し、パターン化した補修計画では、パターンの中にすでに共有する足場が多く含まれており、その分、補修費用を増加させることなく補修部位の選択が行えるため、より大きな評価値の増加量が得られたのではないかと考えられる。解析対象となる橋梁データによっては、同じような結果にならない可能性もあると考えられるが、パターン化した補修計画が十分な評価値の増加量を得られたということは、より優れた補修計画代替案が作成できたということを意味する。

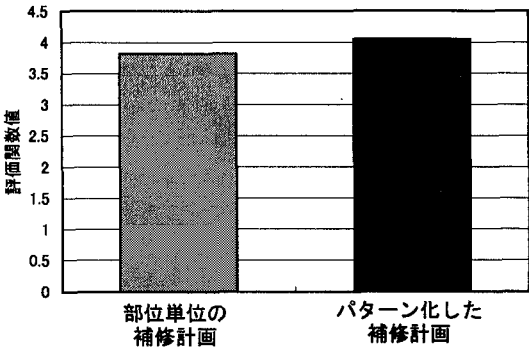


図-7 コーディング別の評価関数値

表-8 ST25 橋の結果

|      | 橋面舗装    | 地覆高欄 | 床版 | 床組工 | 支承 | 伸縮継手 | 排水装置 | 塗装 | 安定材質 | 耐震性 |
|------|---------|------|----|-----|----|------|------|----|------|-----|
| 点検結果 | 3       | 2    | 2  | 1   | 1  | 2    | 2    | 2  | 1    | 2   |
| 補修箇所 | 補修タイプ7  | ●    |    |     |    | ●    |      |    |      |     |
|      | 補修タイプ14 |      |    |     | ○  |      |      |    |      | ●   |
| 足場   |         |      |    |     |    |      |      |    |      | ③   |

●補修部位、○非補修対象、③張り出し足場

ここで、得られた補修計画代替案について、一例としてST25橋の結果を表-8に示す。ST25橋では、点検結果より、橋面舗装、地覆高欄、床版、伸縮継手、排

水装置、塗装、耐震性の7つの部位が要補修となっていた。この中から、GAによる解探索の結果、補修部位として選ばれたのが、橋面舗装、伸縮継手、耐震性の3つである。これらの選択された補修部位は、表-2の組み合わせルールでは7番目と14番目の補修タイプが組み合わせられた補修パターンである。すなわち、伸縮継手を補修することから橋面舗装を同時に補修するようにしたものである。また、耐震装置については、表-2では支承を同時に補修するようになっているが、この橋梁については支承は要補修部位ではなかったため、耐震装置が単独で補修部位として選択されたことになる。

### 3.2 SGA と VGA との比較

#### (1) VGA のパラメータ決定

まず、本研究のパターン化した補修計画における線列のコーディングのもとで、VGAを導入するにあたり、VGAにおける感染確率と感染世代間隔のパラメータを決定するための数値実験を行った。ウイルスが発生する世代間隔とは、たとえば、世代間隔が5の場合、5世代に1度の割合で確率的にウイルスが発生するということである。また、感染率とは、ウイルスの感染力の強さを決めるパラメータであり、感染率が0.3ならば、全個体の3割が確率的に感染することになる。

ここで、のべ感染数を式(5)によって定義する。のべ感染数とは、収束世代までの間に、ウイルスに感染した個体ののべ数であり、実際には、感染はパラメータとして与えた感染確率や世代間隔によるが、ここで定義するのべ感染数は感染した個体のおおよその数を推定するものである。

$$\text{のべ感染数} = N \times p_n \times \frac{G}{p_g} \quad (5)$$

- $N$  : 個体数
- $G$  : 収束世代数
- $p_n$  : ある個体がウイルスに感染する確率
- $p_g$  : ウイルスが発生する世代間隔

図-8、図-9、図-10に示す図は、それぞれの感染手法におけるパラメータ決定のための数値実験の結果をプロットしたものである。横軸に式(5)によって定義したのべ感染数を、縦軸に評価関数値をとっている。世代間隔は、1世代、2世代、5世代、10世代、50世代、100世代、300世代とし、感染確率は0.1から1.0の範囲で0.1刻みで変化させた。図には世代間隔が同じものを同じ点でプロットしてあるが、世代間隔が同じでも感染確率がそれぞれ異なり、同じ世代間隔であれば、右へ行くほど感染確率が高いことを意味する。

図-8はTypeAにおける結果である。この図より、感染回数が増えると評価関数値が下がる傾向が見られるが、のべ感染数が $3 \times 10^4$ となる世代間隔、感染率の付近では、概ね他より優れた値が得られており、5世代間隔で感染率が0.1において最も高い値となった。

図-9はTypeBにおける結果である。この感染手法においては、ウイルスをばらまけばばらまくほど、優れた値が得られる結果となっている。しかし、のべ感

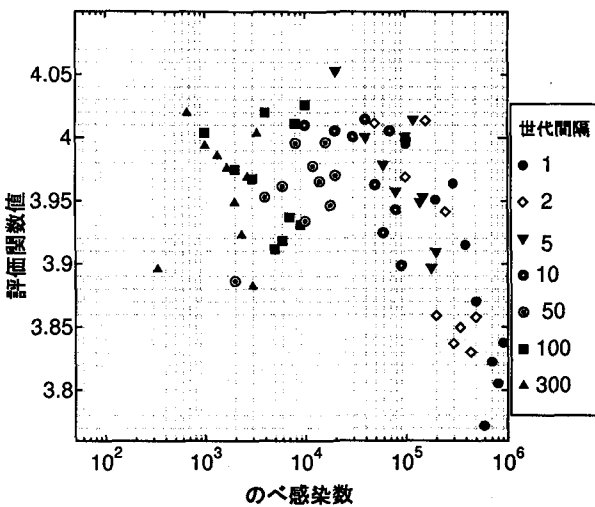


図-8 のべ感染数と評価関数値 (TypeA)

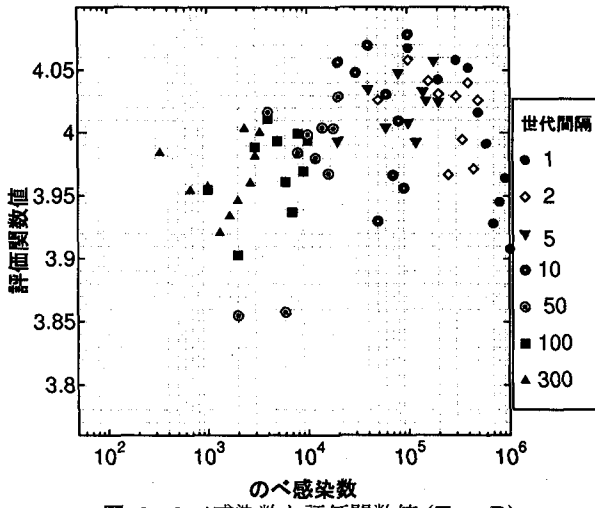


図-9 のべ感染数と評価関数値 (TypeB)

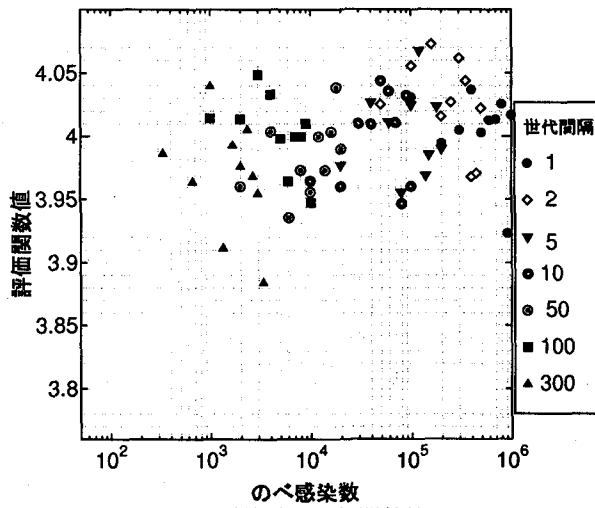


図-10 のべ感染数と評価関数値 (TypeC)

染数が $10^6$ のあたりまで行くと、逆に良い値は得にくくなっている。

図-10はTypeCにおける結果である。このこの感染手法では、ウイルス感染の回数を増やしていくと評価

関数値がおおむね優れた値となっているが、1世代間隔までいくと逆に優れた値が得にくくなっている。世代間隔が2世代で、感染確率が0.3から0.5のパラメータの時に、非常に評価関数値の高い値が得られており、このようなパラメータの組み合わせで試行を行えば、優れた値が得やすくなるのではないかと考えられる。

## (2) SGA と VGA との比較

パラメータ決定のための数値実験の結果より、感染手法Aでは感染確率0.1、世代間隔5、感染手法Bでは感染確率0.1、世代間隔1、感染手法Cでは、感染確率0.3、世代間隔2を最適なパラメータと判断して、これらの諸数値のもとでそれぞれ10回の試行を行い、SGAとの比較を行った。なお、交叉確率や突然変異確率など、その他のパラメータについては全て同じものを使用している。

図-11は数値実験の結果をプロットしたものである。この図から、いずれの感染手法においても、SGAに比べて優れた値となっており、VGAの優位性が示されたといえる。感染手法のTypeAとTypeBでは、TypeBの方がTypeAに比べて比較的良い値が得られた。TypeBではTypeAの感染手法に、個体の評価関数値を下げるような良くないと思われる遺伝子が集団内に広がるのを防ぐ操作を加えており、その効果が現れたものと考えられる。感染手法のTypeCでは、ほぼ全ての試行でSGAを上回っており、この3つの感染手法の中では最も優れた結果となった。この感染手法では、ウイルスに適応度を持たせることによって、より優れていると思われる遺伝子を積極的に集団内に感染させており、ウイルス感染によって、解をより大きな値へと導いたものと考えられる。

ここで、最も優れた値が得られた感染手法のTypeCについて考察する。TypeCでは、ウイルスに適応度を与えており、ウイルス感染はそのウイルスの適応度が高いものほど、頻繁に行われたと考えられる。このウイルスに与えた適応度が、GAの計算の最終世代においてどのような値となっていたのかについて、ST3橋を一例にとり考察する。

図-12はST3橋について、横軸にウイルスが運ぶ補修パターン、縦軸にウイルスの適応度を表している。なお、ウイルスの適応度にはべき乗スケールを施しており、図では、スケール前と後の値を示している。

ここで選択された補修パターンはウイルスの適応度が3番目のものであった。この時の試行の評価関数値は4.069と非常に高い値であったので、この選択された補修パターンが個体の評価関数値が高いときの部分解であるということが出来る。(ただし、他の遺伝子配列によってはそうでない可能性もある。)そして、そのような個体の評価関数値を大きな方向へと導く部分解となる補修パターンが、高い適応度を持ったウイルスとして頻繁に集団内にばらまかれたということは、ウイルスの感染によって、解がより評価関数値の高い方向へと導かれたということの意味するものと考えられる。

今、ST3橋を一例にとったが、続いて、各橋梁ごとのウイルスの適応度と最終的に線列として選ばれた補修パターンについて見てみる。図-13は、各橋梁におけるウイルスの適応度と選択された補修パターンを示し

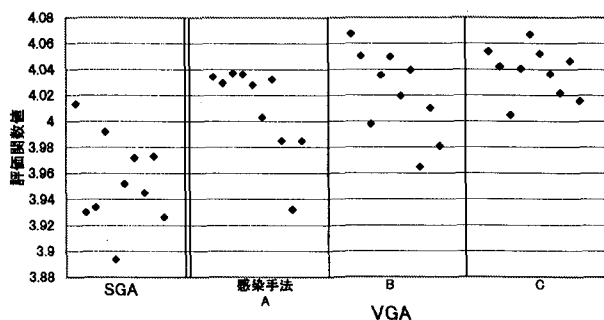


図-11 SGA と VGA との比較

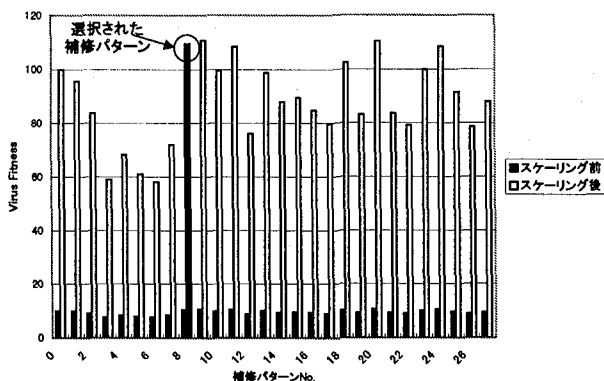


図-12 ウイルスの適応度と補修パターン (ST3 橋)

ており、一つの棒グラフは、一つの橋梁における全ての補修パターンを、そのウイルスとしての適応度が高いものから順に左から並べていったものであり、グラフにおける1マスの大きさは、最終世代におけるウイルス自身の適応度の大きさを表している。ただし、ウイルスを選択する際には、ウイルスの適応度にべき乗スケールを施しているが、このグラフは、スケール前のものである。GAによって選択された補修パターンは黒く塗りつぶしてある。ここで示されたような補修パターンの組み合わせのとき、橋梁群全体での評価関数値が非常に大きな値となる。なお、橋梁によっては、黒く塗りつぶされた補修パターンが存在しないものもあるが、これは、ウイルスの適応度がほとんど0に近く、マスの大きさとして表現されていないためである。

図-13から、概ね、選択された補修パターンとウイルスの適応度が高いものとが一致しており、ウイルスの適応度が高いものがウイルス自身に与えた適応度の妥当性が示されたといえる。

続いて、図-14はSGAとVGAの各世代における評価関数値と標準偏差の推移を示している。図の上から、評価関数値の最大値、平均値、最小値となっており、これらは左側に軸を、また、その下は標準偏差値となっており、これは右側に軸をとっている。図-14より、標準偏差の値についてVGAの方がSGAよりも大きくなっており、集団内のばらつきが大きいことを示している。また、評価関数最大値の推移では、SGAが世代が進むとほとんど更新しなくなるのに対し、VGAでは、最後

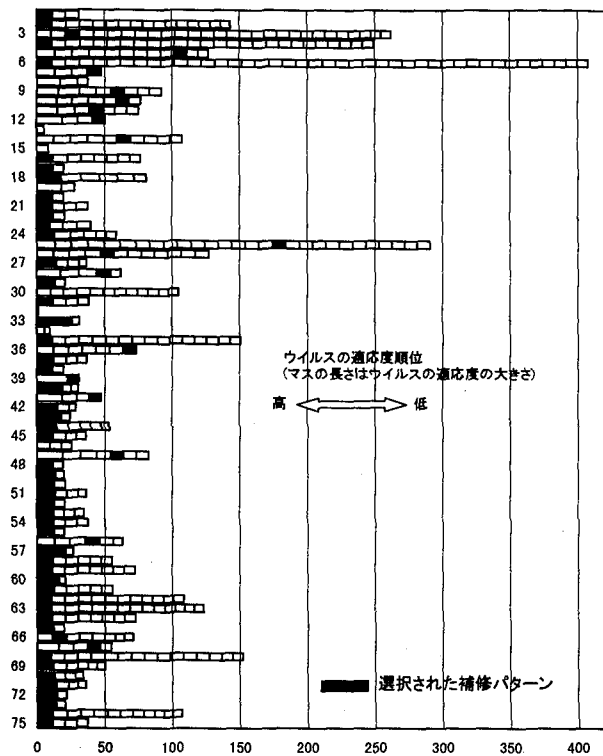


図-13 ウイルスの適応度と選択された補修パターン

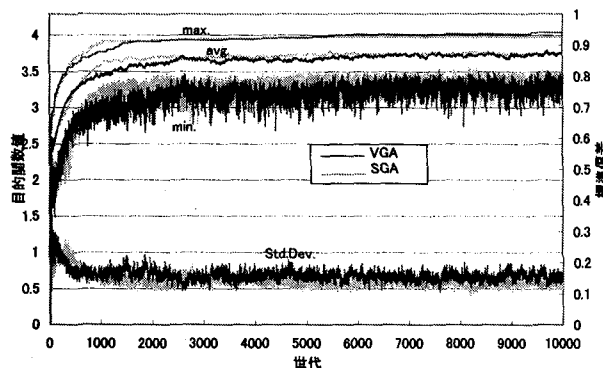


図-14 世代推移

まで評価関数値が更新し続けており、ウイルス感染によって集団内のばらつきは大きくなるが、その分、局所解から脱しやすくなっていることを示しているといえよう。

#### 4. 結論

本研究では、橋梁補修計画代替案の作成において、まず、橋梁単位での補修計画の最適化を優先させ、同時に補修すべき部位を組み合わせることにより、補修部位のパターン化を行った。結果として得られた代替案は、全て組み合わせのルールに合致するものであり、評価値の増加量も十分に大きな値が得られたことから、より優れた補修計画案とすることができたといえよう。

続いて、パターン化したコーディングのもとでウイルス進化論の導入を図った。ウイルス進化論の導入では、3通りの感染手法について、パラメータ決定のための数値実験を行い、それぞれ最適と思われるパラメータのもとで、VGAとSGAとの比較のための数値実験を行った。数値実験の結果から、VGAの方が優れた解を得ることができ、VGAの優位性が示せたといえる。ただし、VGAの課題点としては、パラメータ設定のむずかしさがあげられる。パラメータのチューニングをいかに効率よく行うかが重要な課題であるといえよう。また、使用するデータや線列の長さ等によって、その効果に違いがでてくる可能性がある。今後、ウイルス感染の手法を改良したり、複数の感染手法を組み合わせ、世代によって使いわけを行うことなどによって、さらに探索能力をあげることができると期待できる。また、免疫アルゴリズムとウイルスGAとの組合せなど、他の手法とのハイブリッド化も解探索の効果を向上させる可能性がある。

#### 参考文献

- 1) 近田康夫, 橋 謙二, 小堀為雄:GA による既存橋梁の補修計画支援の試み, 土木学会論文集 No.513/I-31,P151-159,1995.4.
- 2) 近田康夫, 木下 真二:点検データに基づく橋梁補修計画立案へのGAの援用に関する研究, 構造工学論文集, Vol.43A, pp.539-600, 1997.3.
- 3) 近田康夫, 清水宏孝, 廣瀬彰則: ウイルス進化型 GA を援用した橋梁補修計画支援に関する研究, 構造工学論文集, Vol.47A, pp.211-218, 2001.3.
- 4) 築山勲, 古田均, 堂垣正博: ウイルス進化型遺伝的アルゴリズムの道路橋維持管理計画支援システムへの適用, 土木学会年次学術講演会, I-B114, 2001.10.4.
- 5) 小野正樹, 宮本文穂, 中村秀明, 河村 圭: 既存橋梁の最適補修・補強計画への遺伝的アルゴリズムの適用, 土木情報システム論文集, pp.181-188, 1997.
- 6) 中原 英臣, 佐川 峻: ウイルス進化論, 早川書房, 1996.
- 7) 長谷川, 松本, 狩野, 西原: ウイルス進化論に基づく制約充足問題の解法, 情報処理学会第 52 回全国大会 2E-7, 1996.
- 8) 近田康夫, 西雄一, 廣瀬彰則, 城戸隆良:スケジュールを考慮したGA 援用橋梁補修計画支援の試み, 構造工学論文集, Vol.46A, pp.371-378, 2000.3.

(2001 年 9 月 14 日受付)